SOMMAIRE

Remerciements :

Nos premiers mots s'adressent à tous ceux qui ont contribué par leur apport scientifique, technique ou matériel à notre projet à savoir :

- Monsieur Noureddine Mesbahi, qui a été un formidable soutien pour nous tout au long de cette aventure qui nous a apporté beaucoup autant sur le plan intellectuel que social.

- Monsieur Denis BROSSARD Chercheur au CEMAGREF de Grenoble section risque naturel spécialisé dans les avalanches

- Véronique Place, documentaliste de la bibliothèque de L'ANENA à Grenoble

- L'autre groupe des olympiades: Maud, Geoffrey, Laura, Cécile et Arnaud qui nous ont permis d'instaurer un sympathique et motivant esprit de compétition.

- Notre famille et nos amis qui nous ont soutenus, aidés et ont su nous remotiver quand il le fallait.

INTRODUCTION

Lors du choix du sujet de nos TPE , M. MESBAHI notre professeur de Physique nous a demandé si nous étions aux Olympiades de Physique . Par le passé (année 2003/2004) des camarades que nous connaissons ont participé et ils ont réussi à être sélectionnés pour Paris où ils ont eu un troisième prix national. Leur expérience dans cette aventure nous a motivé pour constituer une équipe (nous étions au début 6 élèves intéressés) afin de nous présenter à notre tour aux Olympiades. Par souci de pluridisciplinarité (Math et physique), nous étions intéressés par deux thèmes. : catastrophes naturelles et les modélisations. N'ayant pas d'idées précises sur le sujet, après discussion avec M. MESBAHI qui nous a suggéré l'idée des avalanches, tout de suite nous avons adopté cette idée intéressante d'autant plus que nous sommes des amateurs du sport d'hiver.

Nous nous sommes posés la double question : « Comment et pourquoi les avalanches se déclenchent-elles? » et « Comment la modélisation du phénomène des avalanches peut-elle amener à une étude précise de ce danger naturel ? »

Pour cela nous allons étudier les différentes propriétés physiques de la neige, les différents types d'avalanches ainsi que les différents facteurs de déclenchement des avalanches. Nous les modéliserons, puis nous finirons sur les méthodes de prévention des avalanches et de protection.

I- Connaître les différentes structures de la neige

Historiquement parlant, les accidents dus aux avalanches ne concernaient que les habitants de la montagne. Les catastrophes étaient rares. Avec le développement du ski alpin et l'aménagement à outrance des stations de ski, le risque n'a cessé de grandir.

Le besoin d'être toujours près de la neige et de vouloir fouler des espaces vierges, a pour effet confronter l'homme au risque majeur. Chaque année en France les avalanches provoquent la mort d'une trentaine de personnes , touchent 350 communes et causent des dégâts estimés à 1,5 millons d'euros.

Depuis quelques années, **la maîtrise de ce risque** est devenue une SCIENCE. Les corps de métier (pisteurs , gendarmes de haute montagne etc…) se sont créés pour limiter ces effets. Depuis plusieurs décennies, les équipes scientifiques du monde entier se sont intéressées au problème et essaient de comprendre les mécanismes physiques qui déclenchent les avalanches.

Comment des vagues blanches pouvant atteindre les 30 à 100 m de hauteur, peuvent-elles se désolidariser du manteau neigeux ?
L'avalanche est un phénomène naturel complexe et varié.

C'est en fait le détachement d'une importante masse de neige qui dévale les pentes, les flancs d'une montagne entraînant souvent de la boue, des pierres etc.… à grande vitesse.

Pour connaître les propriétés physiques de la neige , Les chercheurs du centre d'étude de la neige (C.E.N) basé à Grenoble , ont tenté de percer l'énigme de l'infiniment petit : le secrets des cristaux et grains de neige .

A) Structure et cohésion de la neige

La neige matière première dans les avalanches, se forme dans les nuages. Son côté merveilleux vient peut-être du fait qu'elle naît du mariage du froid et des poussières ou autres particules en suspension dans l'atmosphère. A leur contact, la vapeur d'eau du nuage d en devient de la glace et les cristaux de neige se développent et se transforment.



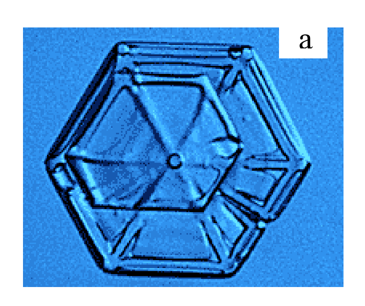
Figure 1 . Coupe d'un manteau neigeux composé des différentes strates qui le composent

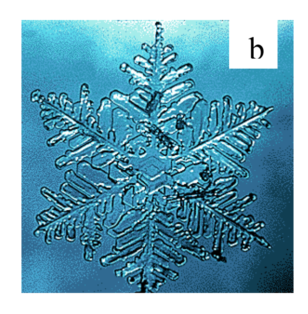
L'examen d'une coupe, réalisée dans un manteau neigeux, montre que celui-ci est constitué d'un empilement de strates de neige aux caractéristiques physiques et mécaniques différentes (Fig. 1). Chacune de ces strates s'est constituée au cours d'un épisode neigeux et les conditions météorologiques au moment de la chute ainsi que celles ayant régné ensuite lui ont conféré ses caractéristiques. Elles continueront d'ailleurs d'évoluer jusqu'à la fonte finale. Outre les conditions météorologiques proprement dites, la topographie du terrain joue un rôle important car elle peut influencer fortement l'effet des événements météorologiques. Le manteau neigeux est donc un matériau hétérogène.

Les caractéristiques physiques et mécaniques d'une strate de neige dépendent en grande partie des types de cristaux de neige qui la composent. A partir de la neige fraîche qui se dépose, on assiste à des transformations des cristaux initiaux sous l'influence d'effets thermiques , dynamiques et mécaniques. Ces transformations appelées métamorphoses vont conduire de la neige fraîche à la fonte par une évolution continue. Les phases intermédiaires sont caractérisées par des combinaisons de cristaux (ou grains de neige) à des stades d'évolution différents. Nous avons sélectionné quelques formes particulières et les avons classées par familles.

1. Evolution de la structure de la neige

1.1 Les cristaux de neige fraîche





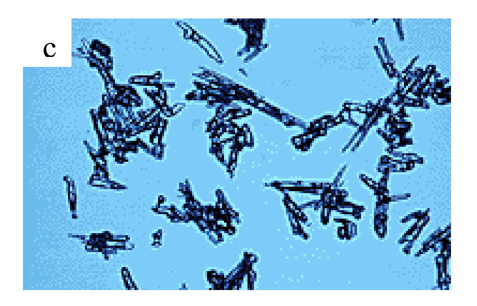


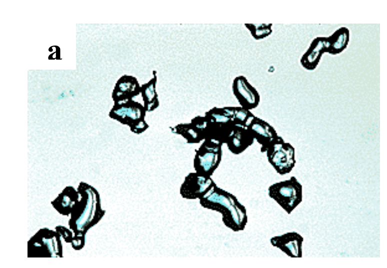
Figure 2 : Les différentes formes d'un cristal de neige
(a) : Plaquette (b) : Neige fraîche en étoile (c) Aiguilles

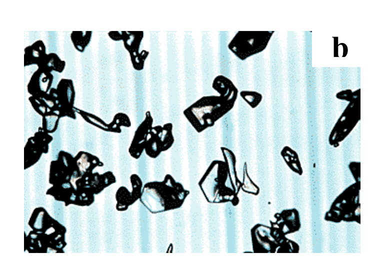
- **Les plaquettes** (figue 1.a): elles se présentent sous forme d'hexagones plans, dont la surface est lisse ou striée. Leur épaisseur (quelques dizaines de microns) est très faible par rapport à leur diamètre (quelques mm). Elles se forment entre -12° C et -18° C.
- **Les étoiles** (fig1.b) : ces cristaux possèdent 6 axes de symétrie et sont constitués de 6 dendrites qui se sont développées dans un même plan autour d'un noyau central et qui sont d'autant plus ramifiées que la saturation est importante. Elles se forment entre -13° C et -18° C. Leurs dimensions sont très variables : de 0,5 à 7 - 8 mm.
- **Les aiguilles** (fig1.c): bâtonnets dont la section est quelquefois hexagonale. Le rapport longueur/diamètre est supérieur à 5. Les aiguilles peuvent être creuses ou pleines. Elles se forment à des températures comprises entre -4° C et -8° C et par forte humidité.

Ces trois familles de cristaux sont les formes de base à partir desquelles se déclinent les autres.

1.2. Les grains de neige

Quelques jours, voire quelques heures dans certaines conditions, suffisent pour que le cristal de neige se transforme, une fois au sol, en un grain susceptible de passer par plusieurs variétés de formes.





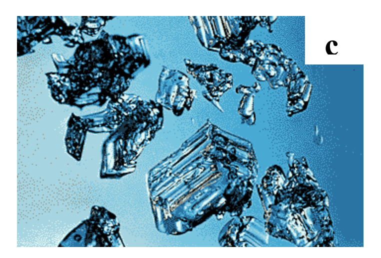


Figure 3 : Les différentes formes des grains de neige
(a) : Grains fins (b) : Grains à face plane (c) Gobelets

On distingue :

- Les grains fins sont de petites particules (moins de 0,5 mm), plutôt sphériques
- Des grains à faces planes : Ce sont des grains anguleux qui présentent, comme leur nom l'indique des faces planes, mais aussi des angles marqués. Leur taille est de l'ordre du millimètre, parfois un peu plus.
- Les gobelets (appelé également givre de profondeur). Ce sont des grains anguleux. Ils se présentent sous forme de pyramides striées, généralement creuses et peuvent mesurer plusieurs millimètres.

2. La cohésion

Les spécialistes du CEN et du CEMAGREF ont entrepris de passer des échantillons de neige aux rayons X (dans un laboratoire du SYNCHROTRON à Grenoble : un des plus grand accélérateur de particules en Europe). Ainsi les chercheurs ont pu visualiser comment les cristaux et les grains sont enchevêtrés les uns dans les autres
La cohésion de la neige dépend de la qualité des liaisons entre les grains. Nous distinguons 4 types de cohésion.

■ La cohésion de feutrage :

La plus caractéristique est l'étoile de neige fraîche, avec ses six branches. Les branches (appelées aussi dendrites) imbriquées les unes dans les autres comme un puzzle, confèrent aux cristaux de neige une certaine cohésion (ce qui signifie que les cristaux de neige adhèrent les uns aux autres), dite " de feutrage ". Cet enchevêtrement permet à la couche de neige de pouvoir tenir sur des pentes très raides, voire verticales. Mais la cohésion de feutrage est fragile (la neige est poudreuse) et de courte durée (quelques heures à quelques dizaines d'heures). Les autres types de neige fraîche possèdent moins cette cohésion, du fait de leur structure moins dendritique.

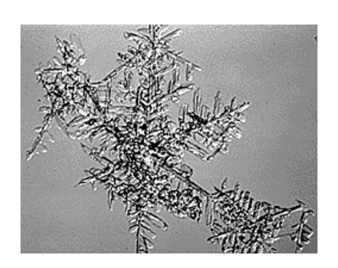
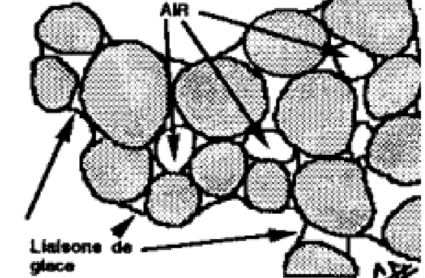


Figure 4: Phénomène de cohésion de feutrage

■ La cohésion de frittage :

Elle concerne les grains fins et se caractérise par la présence de soudures entre les grains. Ces dernières sont le fruit de la condensation de vapeur d'eau aux points de contact entre les grains. Ce type de cohésion est assez propice à la propagation des cassures.
Il se forme des ponts de glace entre les grains de neige, en quelques minutes si la température est faiblement négative, par des alternances de sublimation /condensation.





■La cohésion capillaire :

Un très mince film d'eau tient entre eux deux grains de neige comme il pourrait tenir deux plaques de verre entre elles. Cette cohésion se produit lorsque la neige est humide : période de fonte, petites pluies, température légèrement positive.
Elle est fragile et susceptible de disparaître dès qu'il y a un peu trop d'eau.

■ La cohésion de regel :

Le manteau neigeux regèle la nuit, ce qui soude les grains par des ponts de glace. Ainsi le froid sur une neige humide diminue le risque d'avalanches en augmentant la cohésion (cohésion capillaire, cohésion de frittage). Cette cohésion est la meilleure.



Figure 5 Phénomène de cohésion de frittage

3. Les facteurs de transformation de la neige au sol

Tout au long de l'hiver, les couches de neige s'accumulent sur le sol puis les unes sur les autres et constituent le manteau neigeux. Chacune d'elles, plus ou moins épaisse, va ensuite évoluer, se transformer puis disparaître en fondant.
Une des premières transformations possibles dans une couche de neige sèche est d'ordre mécanique. En effet, les divers chocs de contact et le simple poids de la couche peuvent contribuer à la fragilité des couches, les cristaux se brisent.

Mais le principal facteur de métamorphose de la neige fraîche est le gradient de température. En effet la neige a un pouvoir isolant certain : la preuve est que les Esquimaux s'en servent pour construire leurs igloos.
Une couche de neige peut être caractérisée par la température de la neige à son sommet, par celle de la neige à sa base (le plus souvent moins froide grâce à la chaleur dégagée par la terre) et par son épaisseur.

Le gradient de température est le rapport entre la différence de température entre le sommet et la base de la couche, et l'épaisseur de cette couche de neige.
Il s'exprime en $°C.m^{-1}$.

SURFACE

Au sommet $T_S < T_B$

$$gradient\ T = \frac{T_B - T_S}{H}$$

H

A la base (prés du sol) du sol T_B

SOL

Figure 6: Illustration du phénomène de gradient de température.

Un **faible gradient** signifie que la température ne varie presque pas quand "on se déplace" verticalement dans la couche, alors qu'un **fort gradient** signifie que la température varie notablement. Ainsi, si la couche de neige est épaisse, il faudra une grande différence de température entre son sommet et sa base pour avoir un fort gradient. Par contre si la couche de neige n'est pas très épaisse, il suffira d'une petite différence de température pour avoir le même fort gradient.
Ainsi souvent dans une couche de neige , chaque grain de neige est plus chaud que celui qui est situé juste au dessus de lui. Cette différence est l'une des causes des métamorphoses de la neige sèche.

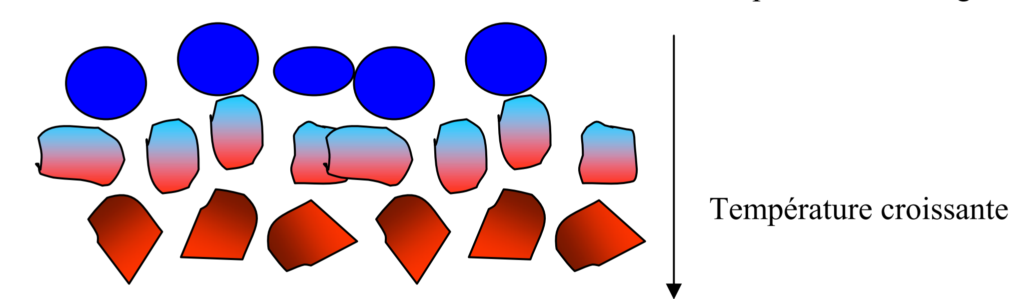


Figure 7 : **coupe d'une couche verticale de neige et l'état thermique de ses grains de neige**

On distingue deux grands types de métamorphoses :

- La métamorphose de faible gradient (< 5°C/m) a pour conséquence d'arrondir les grains, de réduire leur taille et de donner une cohésion de frittage à la couche concernée.
- La métamorphose de moyen (entre 5 et 20°C/m) et fort gradient (> 20°C/m): ses effets sont exactement opposés à la précédente. Les grains, deviennent anguleux, la taille des grains ne diminue pas et peut même augmenter. La couche de neige qui en résulte n'aura plus qu'une très faible cohésion, voire aucune cohésion.

Par ailleurs, l'eau (sous forme liquide), qu'elle provienne de la fonte de la neige ou de la pluie, qui s'infiltre entre les grains de neige d'une couche a pour effet de les arrondir et d'en augmenter la taille, au fur et à mesure des cycles gel / dégel.

La connaissance de la structure de la neige et de sa cohésion est donc fort intéressante et dévoile une partie du mystère des avalanches. Les spécialistes essaient d'expliquer comment et pourquoi les cristaux ont au départ une parfaite cohésion entre eux et finissent par se disloquer et créer des dangers. Résoudre définitivement cette énigme serait un grand pas en avant, mais pour le moment les avalanches conservent une partie de leur secret.

B) Propriétés physiques de la neige

Pour étudier la neige et les avalanches, il est nécessaire d'utiliser plusieurs paramètres physiques tels que la masse volumique, la densité, la porosité, la teneur en eau liquide…

1) La masse volumique de la neige

La masse volumique est égale au rapport entre la masse d'un certain volume de neige et ce même volume.

$$\text{Masse volumique} = \frac{\text{Masse M d'un volume V de neige (kg)}}{\text{Volume V de neige (m}^3\text{)}}$$

Nous avons l'habitude d'employer abusivement le terme de densité au lieu de masse volumique. En fait, la densité est égale au rapport entre les masses volumiques de la neige et de l'eau

$$\text{Densité} = \frac{\text{Masse volumique de la neige (kg/m}^3\text{)}}{\text{Masse volumique de l'eau (1000 kg/m}^3\text{)}}$$

Ainsi une neige de masse volumique égale à 150kg/m^3 a une densité de 0.150

Remarques

- La masse volumique de la neige varie entre 20kg/m^3 (neige fraîche) et 500kg/m^3 (vieille neige).
- La glace a une masse volumique de 917 kg/m^3.

La masse volumique dépend, au moment de la chute de neige :

- du type de cristal (étoile, plaquette, aiguille, etc.)
- de la température de l'air et de la force du vent

Elle dépend également après contact avec le sol :

- du poids des couches supérieures
- de son état de transformation (type de grain)
- de son humidité

2) Notion de porosité de la neige

La neige contient une certaine quantité d'air. La porosité de la neige permet de mesurer le pourcentage massique d'air qu'elle renferme.

Ainsi, la masse volumique et la porosité de la neige sont reliées par l'expression suivante :

$$Porosité = 1 - \frac{Masse\ volumique\ de\ la\ neige\ (kg.m^{-3})}{masse\ volumique\ de\ la\ glace\ (917\ \ kg.m^{-3})}$$

Exemples :

- Si une neige dont la masse volumique est de 100kg/m^3 contient, par exemple 89 % d'air :
  $1-\frac{100}{917}=0{,}8908$ soit 89% d'air
- Une neige de masse volumique 800kg/m3 : $1-\frac{800}{917}=0{,}1275$ soit 13% d'air

3) Notion de Teneur en Eau Liquide(TEL)et d'humidité

La neige est dite humide lorsque sa température est à 0°C. Nous pouvons utiliser le paramètre de TEL pour mesurer les proportions d'eau liquide présente.

On distingue :

$TEL\ massique=\frac{Masse\ d'eau\ liquide}{Masse\ de\ la\ neige}$ et $TEL\ volumique=\frac{Volume\ d'eau\ liquide}{Volume\ de\ la\ neige}$

Une relation existe ente ces grandeurs :

TEL volumique = TEL massique × la densité

4) Compressibilité et tassement de la neige et résistance

a) Compressibilité et tassement de la neige

Lorsque la neige est fraîche, elle a une meilleure compressibilité.
Lorsque la neige est tassée ou compressée, cela lui offre une plus grande résistance.

Le tassement s'opère naturellement :

- dans les couches internes sous l'effet du poids des couches supérieur.
- et dans chaque couche sous l'effet des métamorphoses et notamment de l'humidification dans le cas de la fonte.

Ainsi, nous pouvons observer des tassements naturels de l'ordre de 15 à 20% du manteau en 24h.

b)Résistance à la traction et à la compression

Soumise à des forces de traction ou de compression, la neige offre une certaine résistance à la rupture qui dépend de sa cohésion et de sa masse volumique. Cependant, elle résiste mieux à la compression qu'à la traction. Le rapport entre les forces est de 10 à 20.

En montagne, sur les pentes, les convexités sont des zones de traction et les concavités des zones de compression pour le manteau neigeux. Les convexités sont donc des endroits présentant un danger de rupture plus marqué qui peut être soit accidentel (surcharge due au passage d'un skieur qui va accentuer la traction) soit naturel (surcharge due aux précipitations ou modification de la cohésion par métamorphose diminuant la résistance à la traction).

II- Qu'est ce qu'une avalanche ?

1- Différents types d'avalanches

1.1 Avalanches de plaque dure

Une plaque est formée par le vent qui transporte la neige qui va s'accumuler sur une autre couche de neige poudreuse. Les plaques cèdent sous l'effet d'une surcharge ou un choc. Ces avalanches sont souvent déclenchées par les skieurs pratiquant du hors piste ou par des promeneurs s'éloignant du sentier.
Une avalanche de ce type se déplace entre 20 et 50 km/h mais la vitesse de déplacement varie selon la pente. Plus la pente est importante, plus la vitesse décroît. La densité de la neige est généralement supérieur à 200 kg/mètre cube.
Ce phénomène s'arrête notamment à cause de la diminution de la pente.
Au dessous de 20° de pente, l'avalanche ralentit et s'arrête.



Figure 8 : Photo d'une avalanche de plaque

1.2 Avalanche de neige humide

Elle concerne la neige printanière ou peut avoir lieu lors d'un redoux hivernal. Pendant ces périodes la température atmosphérique augmente, la neige se transforme en pluie. La pluie alourdit la neige qui fait que par conséquent, la neige a une densité très importante de l'ordre de 200 a 600 Kg/mètres cube. Leur vitesse de déplacement est peu importante, 10 à 20Km/h. Malgré la faible vitesse de déplacement de ces avalanches, la pression exercée est très importante car la densité de la neige déplacée est très élevée à l'instar de la quantité de neige déplacée.

1.3 Avalanches de neige aérosol

- Ces avalanches sont en fait un écoulement de particule de neige dans l'air. Elles prennent de la vitesse au fur et à mesure de leur évolution de l'avalanche. Celles ci peuvent atteindre très rapidement 100 à 400 km/h. Elles sont impressionnantes et d'une puissance phénoménale car il y a surpression avant le passage du front de l'avalanche et il y a dépression après le passage de cette même avalanche. On appelle ce phénomène «Onde de choc »

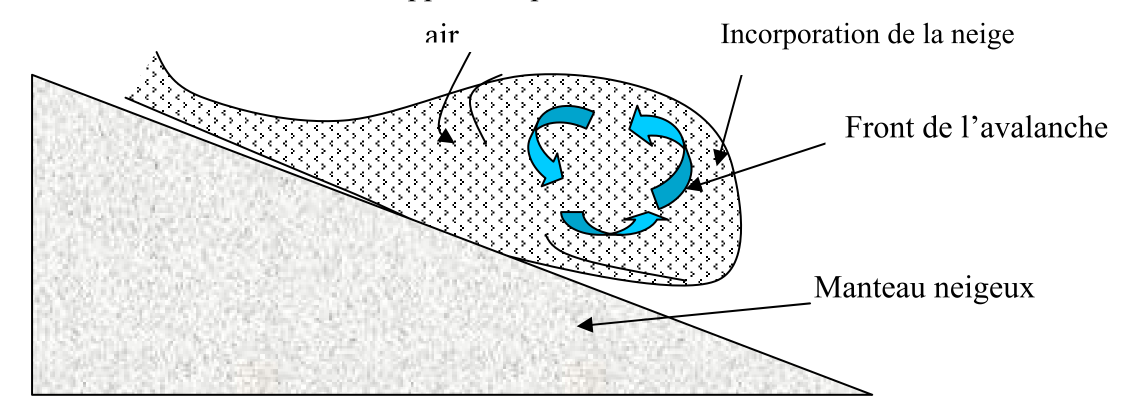
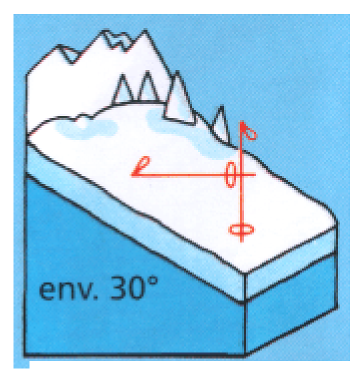


Figure 9 : Schéma simplifié d'une avalanche en aérosol

2. Les facteurs de déclenchement

2.1 Terrain

Le danger d'avalanche augmente avec la déclivité de la pente. Les avalanches peuvent déjà se produire sur des pentes de 30°. Les pentes à l'ombre sont plus exposées au risque d'avalanche que celles ensoleillées.



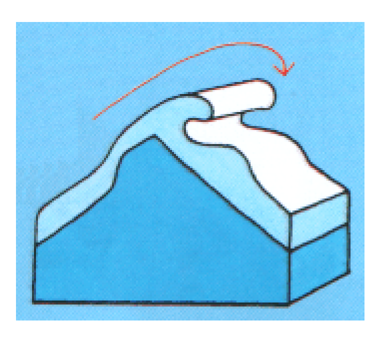
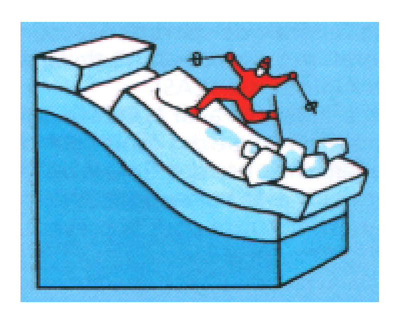



Figure 10: Différentes configurations de l'avalanche de plaque : instabilité du manteau neigeux

2.2 Neige fraîche et vent = danger d'avalanche maximal!

Plus la couche de neige fraîche est importante, plus grand est le danger d'avalanche. Lors de chutes de neige accompagnées de vent, la neige est emportée en tourbillons et déposée dans les pentes abritées. Les corniches de neige sur les crêtes signalent souvent de telles accumulations de neige soufflée.

2.3 Manteau neigeux

Le poids du manteau neigeux engendre d'énormes forces de cisaillement auxquelles les différentes strates n'opposent souvent qu'une résistance insuffisante.
Dans une pente avalancheuse, de très faibles charges supplémentaires, telles que le poids d'un skieur par exemple, suffisent généralement pour rompre l'équilibre et déclencher une avalanche.
Un manteau neigeux peu important n'implique pas un faible danger d'avalanche.

III- Le mouvement et la mécanique des avalanches: MODELISATION

A : Modélisation des avalanches

Avant toute chose, on peut faire remarquer qu'un modèle d'avalanche est une *représentation* simplifiée de la réalité (à travers le regard qu'en a le scientifique), qui doit rendre compte de phénomènes complexes. Les mécanismes élémentaires (comportement rhéologique, reprise, etc.) sont en généralement mal connus; de ce fait, il n'est possible de vérifier la pertinence d'un modèle qu'à travers sa formulation globale et non par l'examen individuel des mécanismes qu'il tente de représenter. Ceci rend très difficile la confrontation entre modèle et réalité. Cette grande complexité a motivé au fil de ces dernières un très grand nombre d'axes de recherche, dont on dresse ici un rapide aperçu :

1. Les modèles mathématiques

Cette dénomination recouvre les modèles statistiques, probabilistes ou liés à la théorie des catastrophes. Dans le domaine des avalanches, ce sont surtout les modèles statistiques qui ont eu du succès depuis le début des années 80.

Par exemple, on peut citer la "méthode norvégienne" qui à partir de paramètres topographiques (comme l'inclinaison de pente) permet de calculer la distance maximale d'arrêt d'une avalanche coulante

L'avantage de la méthode est qu'elle ne nécessite pas une connaissance précise des phénomènes et qu'elle est rapide à mettre en oeuvre.

Ses inconvénients sont :

- qu'elle ne fournit que des résultats sommaires (distance d'arrêt), tout en nécessitant des séries d'événements avalancheux passés suffisamment importantes pour une même région,
- et que son extrapolation à des phénomènes autres (par exemple utiliser un modèle calé pour des avalanches coulantes pour étudier des aérosols) est douteuse.

1.2. Les modèles empiriques théoriques

Nous appelons ici *modèle empirique* une procédure de calcul qui se fonde sur un cadre théorique, mais qui, à cause du nombre d'hypothèses et d'approximations requises, a recours à des formules empiriques et nécessite le calage d'un certain nombre de ses paramètres. Concernant les avalanches coulantes, tous les modèles sont des variantes d'une même base.

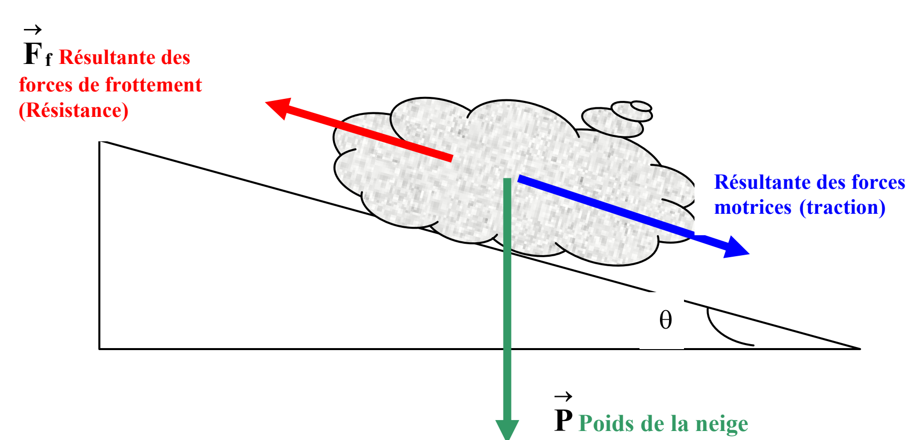


Figure 11 : schéma simplifié recensant l'inventaire des forces appliquées au bloc de neige au cours d'une avalanche

En assimilant en régime permanent une portion de fluide à son centre de masse, le bloc de neige est soumis à deux grands types de forces(figure **11**):

- le poids de la neige qui l'attire naturellement vers le bas
- un autre ensemble de forces dites de résistance. Elles sont due aux frottements de la neige sur le sol de la piste et aux points de cohésions (les endroits où le bloc de neige soudé au sol).

D'une manière simplifiée, la composante du poids qui a tendance à provoquer le mouvement vers le bas peut être compensée par la force de résistance $\vec{F_f}$. Tant que cette résistance est importante (et relativement supérieure au poids) , il n' y aura pas risque d'avalanche.

Deux possibilités de causes d'avalanches peuvent être envisagées d'une manière schématique :

- Soit les forces de résistance diminuent donc les forces d'encrage peuvent diminuer (la cohésion de la neige peut diminuer).Les forces de résistance deviennent alors inférieures à la composante motrice du poids.
- Soit le poids du bloc de neige ou le poids d'un objet quelconque (un skieur par exemple) crée une surcharge . Celle-ci va pouvoir rompre les points de contact et le résultat sera le même pour le déclenchement d'une avalanche.

Nous nous sommes intéressés également à la partie cinématique d'une avalanche c'est-à-dire comment varient sa vitesse et son accélération.
Par application de la seconde loi de Newton on obtient :

$$(1) \qquad \boxed{\mathbf{M}\frac{\mathbf{d}\vec{\mathbf{V}}}{\mathbf{dt}} = \mathbf{M}.\vec{\mathbf{g}} + \vec{\mathbf{F}}_\mathbf{f} + \vec{\mathbf{N}}}$$

où M, la masse de l'avalanche, $\vec{N}$ désigne la composante normale de la réaction du sol (la piste) et $\vec{F}$ désigne la force résultante de frottement.

En projetant cette relation vectorielle sur l'axe de la direction de propagation de l'avalanche de neige (l'axe parallèle à la pente et orienté vers le bas), on obtient la relation algébrique :

$$(2) \qquad \mathbf{M}\frac{\mathbf{dV}}{\mathbf{dt}} = \mathbf{M.g\sin\theta - F_f} + 0$$

Les forces de frottement dues à différents processus de dissipation sont complexes à modéliser suivant le type de frottement choisi (solide/solide , solide/liquide ou solide/liquide/gaz).
Cependant, la plupart des auteurs s'accordent à exprimer leur résulatante de la façon suivante :

$$(3) \qquad F_f = a + bv + cv^2.$$

- ✓ Le premier terme représente le frottement solide : $a = Mg.\mu\cos\theta$
- ✓ Le second terme b.v est du aux forces de viscosité liées à la variation de la vitesse dans l'écoulement. Ces forces sont prépondérantes dans les écoulements très lents donc sont négligés dans la plupart des modèles.
- ✓ Le troisième terme représente la turbulence de l'écoulement et le coefficient de frottement turbulent c s'exprime par :

$$\mathbf{(4)} \qquad \mathbf{c = \frac{Mg}{R_H\xi}}$$

L' expression (approximative) de la valeur de la résultante de frottement) est alors :

$$(5) \qquad \boxed{\mathbf{F_f = Mg\left(\frac{V^2}{R_H\xi} + \mu.\cos\theta\right)}}$$

où θ désigne l'angle de la pente
μ, ξ sont des constantes déterminées empiriquement et censées représenter des coefficients de frottement solide et turbulent,
R_H est le rayon hydraulique = le quotient de la surface mouillée par le périmètre mouillé **...**) .
Dans un tel modèle, la vitesse maximale atteinte par l'avalanche (vitesse limite obtenue par annulation du premier terme de l'équation (1) : dV/dt en régime permanent) est telle que :

$$\mathbf{M\frac{dV}{dt} = Mg.\sin\theta - F_f} = 0 = \mathbf{Mg\sin\theta - Mg\left(\frac{V^2}{R_H\xi} + \mu.\cos\theta\right)}$$

⇨

⇨

⇨ on obtient

$$(6) \quad \boxed{V = \sqrt{R_H . \xi (\sin\theta - \mu \cos\theta)}}$$

Ce modèle, quoique très simple, arrive à fournir des données correctes (vitesse maximale, distance d'arrêt) pour des avalanches coulantes d'ampleur suffisante à condition que les paramètres dynamiques soient correctement calés.
Concernant les aérosols, les chercheurs ont retenu le modèle suivant : le corps de l'avalanche est assimilé à un écoulement turbulent soumis uniquement à la poussée d'Archimède .
Après avoir intégré grossièrement des équations, on montre qu'il existe deux phases : une phase d'accélération suivie d'une phase de décélération. Dans cette dernière phase, le calcul est un peu compliqué pour nous vue notre niveau de connaissances en physique et en mathématiques).
Les chercheurs spécialistes ont montré que la valeur moyenne (approximative) de la vitesse est telle que :

$$(7) \quad V \propto \sqrt{\frac{\sin\theta}{x}}$$

x est la distance parcourue depuis le point origine de l'avalanche et θ l'inclinaison de la pente. L'originalité de ce modèle est que la validation, puis le calage des paramètres, s'est faite à partir d'essais en cuve noyée.

1.3. La modélisation sur maquette

On cherche à modéliser un écoulement en créant un écoulement similaire à échelle réduite. On peut distinguer les *modèles analogiques*, qui ne font qu'exploiter la *similarité* d'apparence entre écoulements naturels et à échelle réduite, et les *modèles en similitude*, pour lesquels le modèle réduit doit satisfaire un certain nombre de critères de similitude (géométrique, mécanique, etc.) qui permettent d'extrapoler les résultats aux écoulements en vraie grandeur. En bref, un modèle analogique ne donne que des renseignements d'ordre qualitatif et un modèle en similitude permet de quantifier les résultats et de les rendre exploitables à condition que les critères de similitude soient remplis.
Il est à noter que les modèles analogiques servent tout à la fois à éclaircir en laboratoire les mécanismes présumés gouvernant le mouvement des avalanches, à valider des modèles dynamiques d'avalanche ou plus rarement à supporter des études d'aménagement (par exemple comment dimensionner au mieux une digue pour tenter de freiner un écoulement ?)

B- Dispositif expérimental :

1. Modélisation d'une avalanche aérosol

Dans cette partie sont présentés successivement :
– le dispositif expérimental et ses différentes configurations ;
– les matériaux utilisés pour réaliser des bouffées
– les techniques de mesures utilisées ainsi que le traitement des données associé.

1.1. Le canal et ses différentes configurations

Le dispositif utilisé pour les expériences est un canal immergé dans une cuve contenant 20 m^3 d'eau douce (cf figure)Le canal est en plexiglas, il mesure 2 m de long, 30 cm de large et 40 cm de haut. Son inclinaison peut être choisie dans une plage variant de 0° à 50° .
En tête du canal se situe un réservoir parallélépipédique de taille 0, 2 m × 0, 3 m × 0, 2 m. Le fluide lourd simulant la neige (solution salée de kaolin) est stocké dans ce réservoir avant d'être libéré dans le canal rempli d'eau douce simulant l'air. Le lâcher se fait à l'aide d'une vanne guillotine soulevée manuellement au temps t = 0.
Le volume stocké dans le réservoir est agité avant l'ouverture de la vanne et ce pour mettre les particules de la solution saline de kaolin en suspension uniforme.
Après un court moment d'attente la vanne est ouverte.

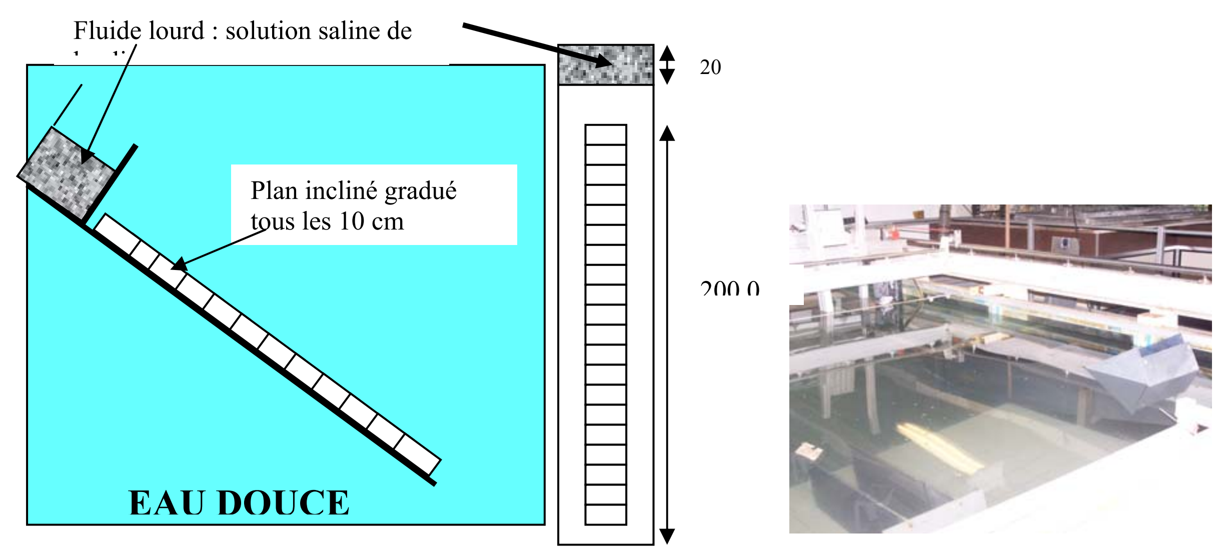


Figure 12 : Le dispositif





Figure 13 : Photos souvenirs au CEMAGREF
Alexandre entrain de préparer la solution salée de kaolin qui sera introduite ensuite dans le réservoir.
Yanis retire la planche guillotine qui servait à retenir la solution dans le le **réservoir.**
Ci-contre : l'avalanche simulée qui dévale la pente**.**



1. 2. Les matériaux employés

Notre choix s'est porté sur le kaolin.
En effet ce matériau a la particularité une fois mouillé d'être légèrement plus dense que l'eau
La masse volumique des particules de kaolin mouillé a été déterminée par pesée. Nous avons obtenu $\rho = 1060\ kg.m^{-3}$. En plus, cette poudre est calibrée et que les particules sont sphériques.

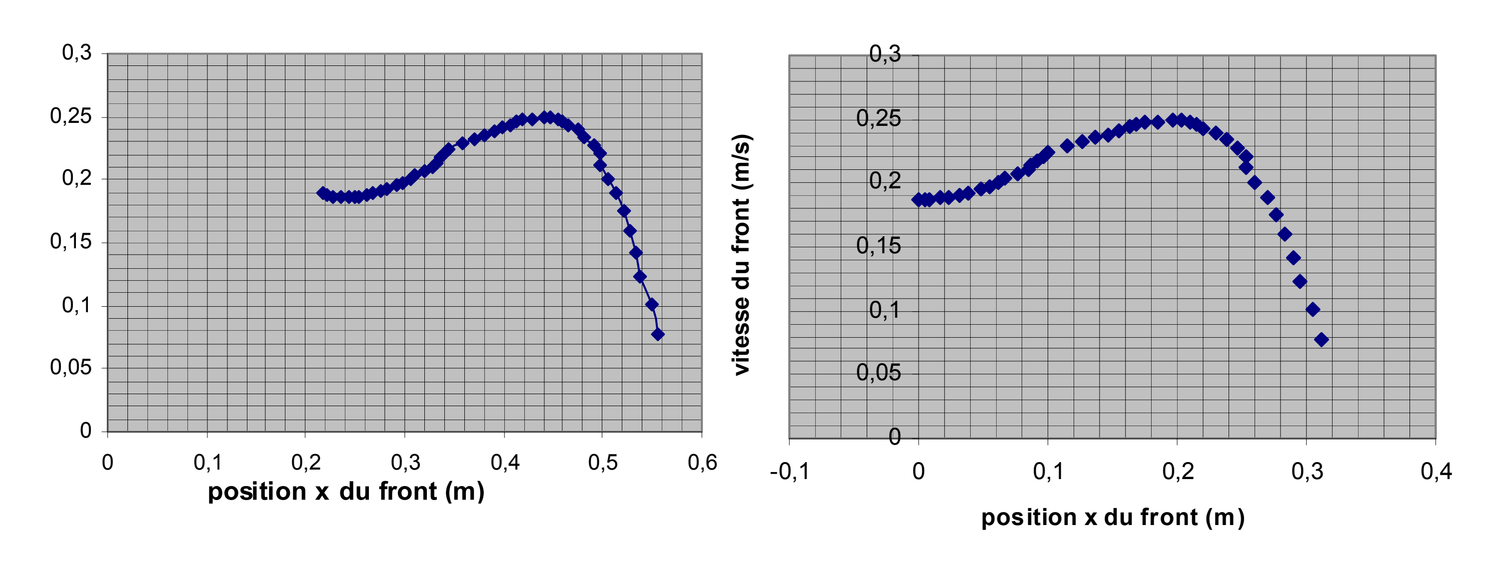
1.3 Mesure des vitesses et discussion des résultats

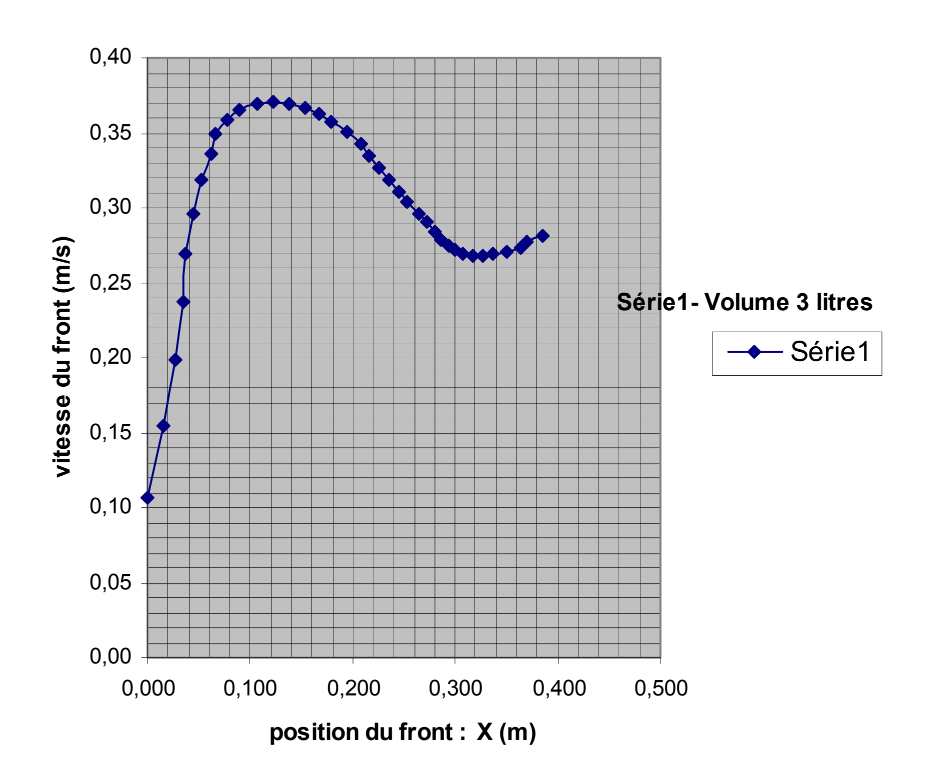
Nous avons procédés ensuite à la détermination de la vitesse de front de bouffées en suivant un protocole d'acquisition des données vidéos .
Le plan du canal où se produit l'écoulement est gradué tous les dix centimètres sur le dessus du canal et sur la partie latérale. Ainsi à l'aide d'un logiciel de pointage on a pu suivre l'évolution du front de la bouffée image par image tout au long de sa descente en fonction du temps.

Nous avons souhaité connaître l'influence de la quantité du fluide lourd (volume de la solution saline de kaolin) sur la vitesse du front de la bouffée.
L'expérience a été répétée 3 fois pour chaque quantité versée de la solution salée de Kaolin .
Dans chacun des cas l'origine des temps a été prise au passage de la première image observée. Nous avons fait notre étude pour une seule inclinaison.
Nous aurions aimé faire l'étude pour plusieurs inclinaisons mais nous n'en avons pas eu le temps.
Il était prévu de rendre une nouvelle visite au Laboratoire de CEMAGREF mais nous avons manqué de disponibilité. En effet cette année (tout au moins au début de ce trimestre), avec les devoirs commun qui s'enchaînent et appartenons à des classes différentes (emplois de temps différents) , il a été difficile nous réunir afin de faire le point sur ces résultats.
Pour les séries de mesures que nous avons réalisés, nous avons déterminé la distance parcourue, la vitesse instantanée et l'accélération du front de la bouffée.

Sur les figures ci-apès (figures 14 et sont représentées quelques courbes de vitesse de front issues de nos expériences que nous avons réalisées au laboratoire de CEMAGREF de Grenoble. Les vitesses de front sont données en fonction de la position x du front de la bouffée sur la pente.. Nous avons aussi reporté la courbe de vitesse moyenne (calculée comme indiqué précédemment à partir du temps moyen de passage) pour des mêmes inclinaisons de pente de 30°.

Figures 14 : Courbes représentatives de la variation de la vitesse en fonction de la position x du front de la bouffée sur la pente
Dans l'ordre 1Litre , 2 Litres ,3 Litres de solutions salines de kaolin





Il nous a été difficile d'interpréter ces courbes. Il s'avère que sont mis en jeu des phénomènes de la mécanique de fluide, très compliqués à notre niveau.

Néanmoins nos résultats sont en parfait accord avec les travaux effectués par certains chercheurs. En effet comme on l'a déjà signalé, ces résultats montrent que :

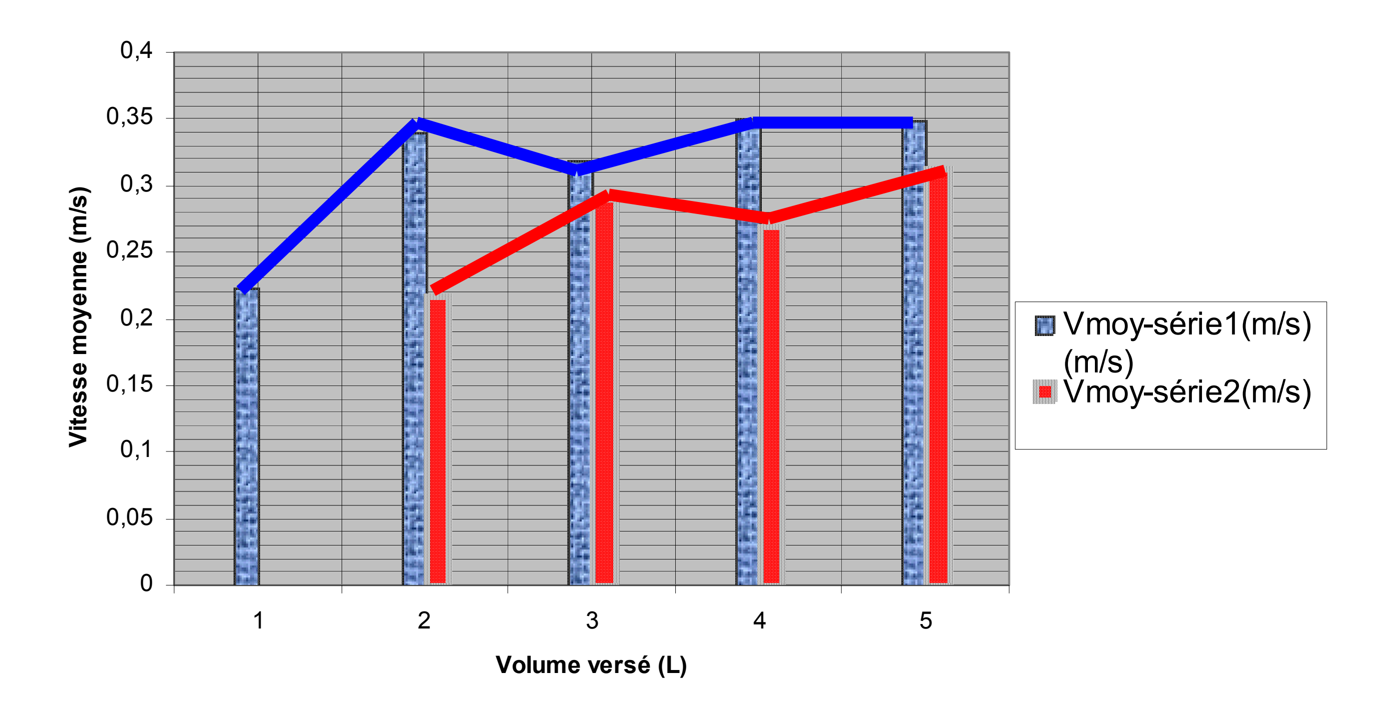
- d'une part la vitesse moyenne de l'écoulement de l'avalanche ne dépend pas d'une manière significative de la masse des bouffées en écoulement. (voir le graphe repésentant la vitesse moyenne en fonction du volume de la solution saline de kaolin)

- Les bouffées que nous avons réalisées se situent dans la zone d'écoulement pour laquelle la vitesse de front est proche du maximum de vitesse.Il apparaît que la majeure partie de la dynamique des avalanches a lieu à vitesse croissante suivie d'une phase de décélération.

Les études menées par **Marie Clément Rastello qui a utilisé un autre matériau ; la sciure de bois au lieu du kaolin** , ont montré que l'expression de la vitesse moyenne V est aussi dépendante aussi des conditions initiales x_0, V_0, A_0 et ρ_0. La comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats du modèle ne se révèle pas très aisée et ce, en partie à cause du choix des conditions initiales (figures **15**).

En effet, de part le fait que l'écoulement commence par un lâcher du fluide lourd initialement immobile dans le réservoir, différents choix de conditions initiales peuvent être envisagés. En prenant l'origine des abscisses au niveau de la vanne, les différents choix d'origine possibles peuvent se formuler de la manière suivante :

- on peut supposer que dés l'ouverture de la vanne, la bouffée a déjà sa forme établie et part avec une vitesse nulle puis accélère.
- il est aussi possible de considérer que dans un premier temps, le volume rectangulaire qu'occupe la bouffée s'effondre à l'ouverture de la vanne et qu'elle ne prend sa forme de bouffée qu'une fois cet effondrement réalisé.



- une troisième hypothèse revient à considérer qu'initialement l'écoulement de la bouffée n'est pas régi par le modèle. La conséquence en est que le comportement de l'expression analytique de V ne décrit le comportement de la bouffée qu'à partir d'une certaine distance de la vanne.

Cela peut occasionner une translation (dans un sens ou dans l’autre) suivant l’axe des x entre la vraie position de la bouffée depuis la vanne et la position donnant la vitesse de l’écoulement

Ces trois hypothèses reviennent à affecter des conditions initiales différentes suivant les cas dans l’expression analytique donnant V. Sur de longues distances, le choix de l’une ou l’autre de ces hypothèses se révèle être sans importance sur l’évolution de V en fonction de x.
En effet à longue distance les conditions initiales n’ont plus d’influence sur l’évolution de la vitesse de la bouffée. E V ’anche, pour de courtes distances le choix de l’origine a une influence sur la vitesse V.

Cette étude permet donc de conclure au fait que le modèle de bouffée tel qu’il a été l’a développé par CEMAGREF, permet de prédire l’évolution de la vitesse moyenne des bouffées de laboratoire sans entraînement de particules à un coefficient multiplicatif près. Il est probable que la présence de ce coefficient multiplicatif soit en partie due à un mauvais choix de la valeur du coefficient de masse que nous n’avons pas déterminé et aux conditions initiales qui impliquent vraisemblablement une vitesse initiale V_0 non nulle.

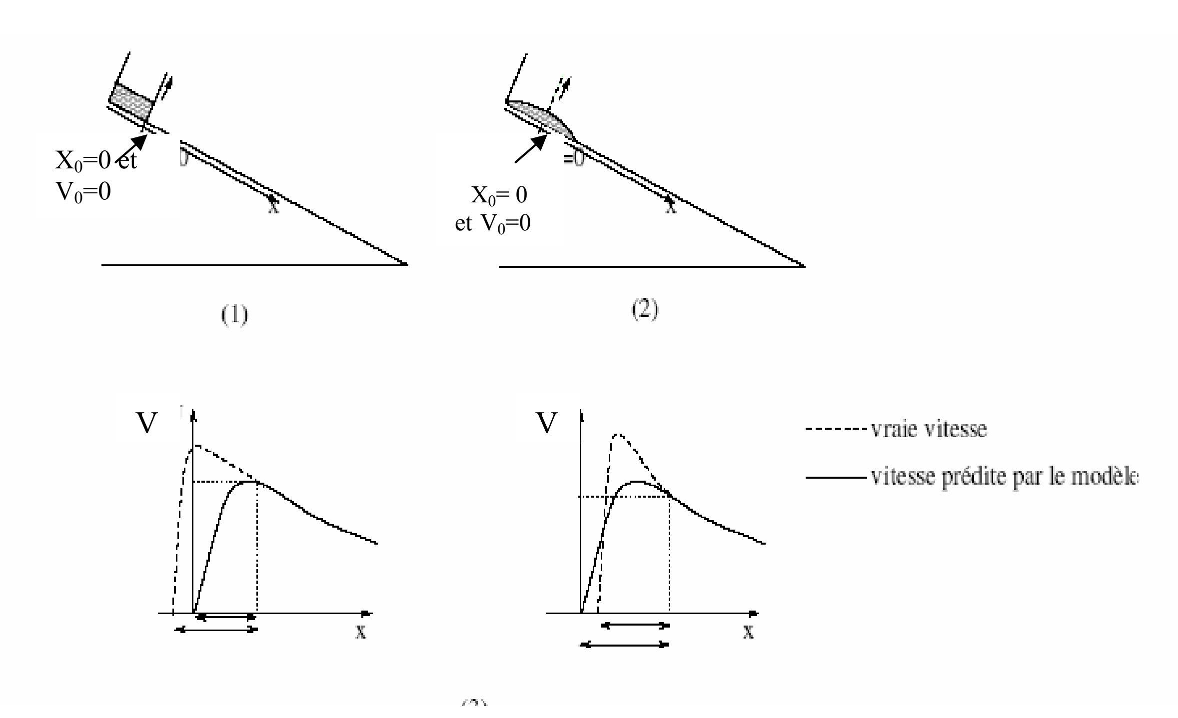


Figure 15 Différentes configurations envisageables pour le choix des conditions initiales de l’écoulement (**d’après les travaux de Marie Clément Rastello qui a utilisé un autre matériau : sciure de bois au lieu du Kaolin**)

B) Modélisation d’une avalanche de plaque

L’avalanche de plaque est l’ennemi public numéro 1, elle est la cause de 90% des accidents, elle se caractérise par une cassure linéaire.

Pour simuler les mécanismes de déclenchement lié à l’instabilité des strates du manteau neigeux, nous avons cherché à recréer une avalanche miniature en reproduisant sur maquette une simulation du phénomène suivant un protocole qui nous a été suggéré par Robert BOLONGNESI (directeur de recherche au centre CEMARGREF unité du Météorisk à Genève) . Ce protocole consiste à utiliser du sucre en poudre et de la farine disposés en couches pour simuler les différentes strates du manteau neigeux.

Pour cela nous avons prix deux planches de bois. Nous y avons ensuite collé quelques cailloux pour représenter rochers et falaises. Après avoir constitué les différentes couches du manteau neigeux , il ne reste plus qu’à lever délicatement le plan incliné et provoquer un déclenchement en faisant exploser un petit pétard pour voir notre avalanche dévaler la pente.

<u>Première simulation</u> : nous avons constitué une seule couche fraîche de farine, on a fait le déclenchement mais l’instabilité de l’ensemble n’est pas suffisante pour que le manteau neigeux puisse descendre : on a simplement provoqué un trou ou éventuellement un léger écoulement mais on n’est pas arrivé à déclencher une avalanche.





Figure16 : photo de notre maquette avant (a)et après (b) et (c) déclenchement de l’avalanche

Deuxième simulation : (voir photo ou vidéo) Nous avons créé 3 couches :

- Une première couche de sucre bien tassée
- Une deuxième couche de farine légèrement tassée
- Une troisième couche de farine simplement soupoudrée au dessus de la seconde.

On provoque le déclenchement, on constate le dévalement d’une avalanche qui représente assez fidèlement ce que l’on peut observer dans la réalité.

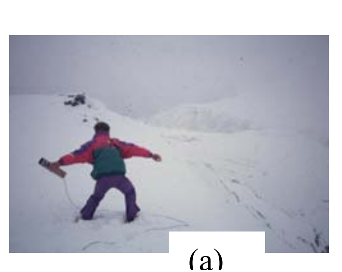
Sur la cassure on observe des épaisseurs différentes assez relativement faibles. On peut constater une plaque « à deux étages »: en bas la couche de sucre simule une strate instable soumise à un fort gradient de température :la couche de neige qui en résulte n'aura plus qu'une très faible cohésion, voire aucune cohésion, elle est constituée de gobelets.

Sur cette première couche est partie la plaque qui représente une couche de neige qui a été ventée et tassée naturellement et sur cette dernière un deuxième départ de la neige fraîche.

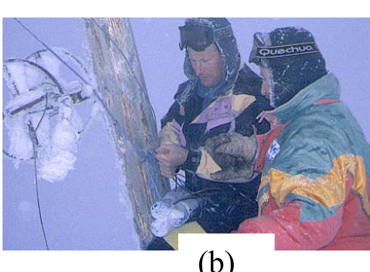
IV- PREVENTION DES RISQUES D'AVALNCHES

Nous présentons dans cette partie un type de prévention des risques d'avalanche : il s'agit provoquer artificiellement une avalanche par utilisation d'explosifs Les différentes techniques sont les suivantes:

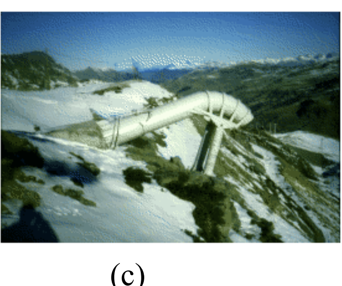
- **Le grenadage à main (Fig 17.a) :** Le plus ancien et le plus dangereux. Dans la mesure où les



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 17 : Différentes techniques de déclenchement d'avalanches préventives
(a) grenade à la main (b) les catex (c) le gazex (d) canon

pentes sont accessibles en ski ou à pied par le haut, deux artificiers lancent des bâtons d'explosifs (ne pouvant dépasser 2,5 kg) dans les pentes à purger. La déflagration produit une onde de choc qui crée une rupture du manteau neigeux. Suivant le résultat, les artificiers renouvellent l'opération. La mèche lente qui doit être d'un mètre minimum leur laisse deux minutes pour se mettre à l'abri, de l'autre côté du versant. Le principal risque est que le choc de l'explosion fasse partir des plaques de neige sous leurs pieds. La charge au moment du lancement est reliée à l'artificier par une corde qui lui permet de la récupérer, s'il y avait une erreur de tir. Ce sont des conditions de travail très difficiles et qui, par mauvais temps, sont très dangereuses. Ces hommes évoluent sur des arêtes qui parfois avec le brouillard et la neige changent complètement de configuration chaque jour : formation de congères, visibilité nulle, plaques à vent se détacha du manteau neigeux...

Les explosifs lancés sur une luge : C'est une variante du grenadage à main.
Les catex (Fig 15.b) : (CÂbles Transporteurs d'EXplosifs) le système est à mi-chemin entre les téléphériques et le déclenchement par hélicoptère.
Les gazex (Fig 15.c): C'est le système le plus pratique pour les artificiers car le déclenchement se fait depuis les bureaux des remontées par un ordinateur, le responsable de tir est le seul habilité à utiliser cet appareil et à en connaître les codes d'accès. Le déclenchement par un gazex est le résultat d'une déflagration d'oxygène et de propane mélangés. Cette explosion, qui équivaut à 27 kg de TNT, se produit au-dessus du manteau neigeux depuis une bouche en fer. Nous avons placé 2 bonbonnes d'oxygène et de propane a laquelle est reliée la bouche. L'inconvénient de ce système est qu'il est fixe et ne peut traiter qu'un point de déclenchement par bouche. Alors, de plus en plus, les stations s'équipent d'avalancheurs.
L'avalancheur (Fig 15.d): C'est un canon, qui envoie des flèches utilisant un mélange de produits chimiques. Ces flèches sont propulsées du canon par de l'azote comprimé et permettent de traiter à distance plusieurs points de déclenchement. La charge de 2,2 kg d'explosif peut être envoyée, suivant un angle de tir de 45°, à 1 800 mètres. Par mesure de sécurité, si toutefois la flèche n'explose pas, l'explosif devient inerte dans la neige au bout de 24 h.



Une avalanche est un phénomène complexe et varié. Deux avalanches ne se déroulent jamais de la même façon. En effet, les chercheurs ont tenté de les reproduire au laboratoire, mais celles-ci se révèlent imprévisibles.
La science a fait de grands progrès au cours de ces dernières décennies, pourtant les chercheurs du centre d'étude de la neige (CEN) et autres centres de recherche (CEMAGREF), restent humbles quant à la précision des informations qu'ils peuvent donner.
Tant que les scientifiques ne pourront maîtriser tous les mécanismes (encore mystérieux) qui peuvent être à l'origine des avalanches, la prévention sur le terrain restera le travail le plus efficace pour protéger les touristes et les alpinistes.
Donc si l'on ne veut pas laisser sa vie, il vaut mieux considérer la pente que l'on convoite dans son environnement : comment est la pente en dessous, au dessus ? Comment est-elle exposée au soleil ? Il faut toujours se méfier des idées reçues il faut par exemple c'est une faible pente, il n'y a aucun risque.
Avant de partir skier, consulter les bulletins météo qui analysent le temps prévu donnent les informations sur la qualité du manteau neigeux.
Ce projet nous a montré la nécessité d'entretenir de bonnes relations avec autrui, un travail de coopération étant primordial pour parvenir à remplir les objectifs que nous nous étions fixés.

BIBLIOGRAPHIE

1) Les avalanches *Pour la Science,* juin 1993, n° 187. NAAIM Mohamed, BOUVET-NAAIM Florence, VIDAL Lionel
2) **La physique des avalanches** *Pour la Science,* mars 2000, n° 269, p. 52-59.
3) **Simulation physique et numérique des avalanches en France** *NAAIM M., MARTINEZ H., CEMAGREF GRENOBLE NIGR.***.** Geogaceta, vol. 20, n° 6, 1996, p. 1375-1376 [Publications:96/0261]
4)* Dynamique des avalanches. Présentation du site expérimental du Col du Lautaret (Hautes-Alpes** *OUSSET F., MARCO O., TAILLANDIER J.M., CEMAGREF GRENOBLE NIGR.).** Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige glace et avalanche, Chamonix, 30 mai - 3 juin 1995, Cemagref Editions, Antony, 1995, p. 249-254 [Publications:95/0217]
5)* Etude de la dynamique des avalanches par méthode sismique, technique de traitement d'images et modèles numériques** *SABOT F., NAAIM M., GRANADA F., SURINACH E., PLANET P., FURDADA G., UNIVERSIDAD DE BARCELONA ESP, CEMAGREF GRENOBLE ETGR, UNIVERSITE JOSEPH FOURIER GRENOBLE..** Annals of glaciology, n° 26, 1998, p. 319-323 [Publications:98/0252]
6) Etude de la dynamique des avalanches de neige en aérosol
Thèse *présentée par* **Marie CLEMENT RASTELLO** *pour obtenir le grade de* **DOCTEUR DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER**
Spécialité : Géophysique

7) Vidéo
- Avalanches L'émission c'est pas sorcier
- Risque d'avalanche- Edition SFRS- Service du film de recherche scientifique
- DVD :NEIGE ET AVALANCHES CONNAITRE ET GERER LE RISQUE Edité par A.N.E.N.A (Association Nationale pour l'Etude de la Neige et des Avalanches de Grenoble

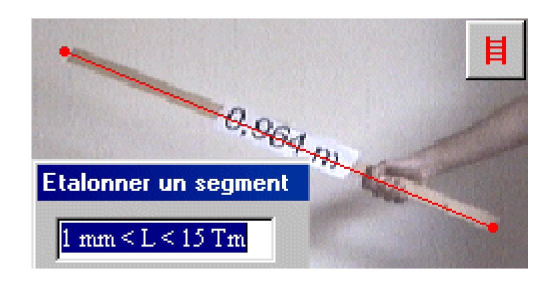
Sites Internet :

ANENA
METEO-FRANCE

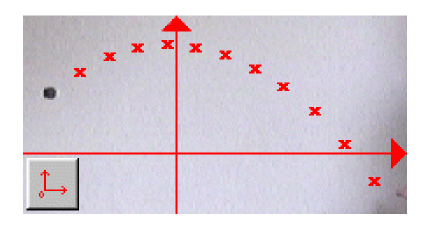
Mode d'emploi simplifié du logiciel AVISTEP



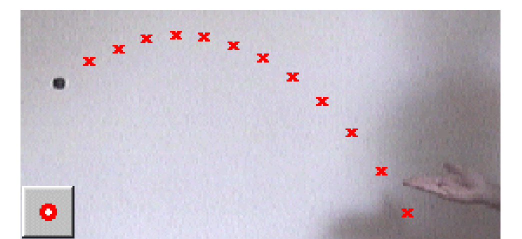
Ouvrir un fichier au format vidéo avi



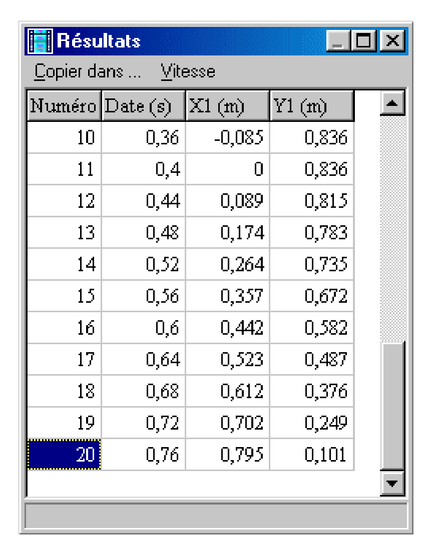
Etalonner les dimensions de l'image en y sélectionnant, à l'aide la souris, deux points. Entrer, à l'aide du clavier, la distance en mètre séparant ces deux points



Choisir un repère d'espace . Les coordonnées des marques seront calculées à partir de l'origine choisie. Le sens de l'axe y'y peut être changé dans le menu AFFICHAGE.



Pointer les positions successives du projectile à l'aide de la souris. Chaque click pose une marque et fait avancer l'animation d'une image.



Numéro	Date (s)	X1 (m)	Y1 (m)
10	0,36	-0,085	0,836
11	0,4	0	0,836
12	0,44	0,089	0,815
13	0,48	0,174	0,783
14	0,52	0,264	0,735
15	0,56	0,357	0,672
16	0,6	0,442	0,582
17	0,64	0,523	0,487
18	0,68	0,612	0,376
19	0,72	0,702	0,249
20	0,76	0,795	0,101

Les résultats sont présentés sous forme de tableau. Les données peuvent être exportées vers le presse-papier par la commande « COPIER DANS » puis « PRESSE-PAPIER »et ensuite collées dans le tableur par la commande « COLLER PAGE ».